

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ПОЛИКРИСТАЛЛЕ С АБСОЛЮТНО ЖЕСТКИМ ВКЛЮЧЕНИЕМ

Г. В. Ласко, Е. Е. Дерюгин

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634021, Томск, пр. Академический, 2/1,  
lasko@ispms.tsc.ru*

Методом элементов релаксации проведено моделирование развития пластической деформации в поликристаллах с абсолютно жестким включением с учетом влияния деформационного упрочнения и количества систем скольжения в кристаллитах.

## 1. Введение

Наличие в локальной области твердого тела материала с иными упругими характеристиками создает при нагружении неоднородное поле напряжений, являющееся концентратором напряжений соответствующего масштаба. В данной работе методом элементов релаксации проводится моделирование развития локализации пластической деформации в поликристалле с включением круговой формы. Рассмотрен случай плоского поликристалла с включением, размер которого намного больше размера кристаллитов. Методами теории упругости [1] континуальной теории дефектов [2-4] было получено аналитические выражения для всех компонент поля напряжений от включения в зависимости от величины внешнего приложенного напряжения:

$$\sigma_y = \sigma_y^1 + \sigma_y^2, \quad \sigma_x = \sigma_x^1 + \sigma_x^2 \quad \text{и} \quad \sigma_{xy} = \sigma_{xy}^1 + \sigma_{xy}^2,$$

где

$$\begin{aligned} \sigma_y^1 &= \sigma + \frac{(1-k_1)\sigma r^2}{2R^2} \left[ 1 + \frac{3r^2 + 10y^2}{R^2} - F + G \right], \quad \sigma_x^1 = \frac{(1-k_1)\sigma r^2}{2R^2} \left[ 3 - \frac{3r^2 + 18y^2}{R^2} + F - G \right], \\ \sigma_{xy}^1 &= \frac{(1-k_1)\sigma r^2 yx}{R^4} \left[ 3 - \frac{2(3r^2 + 4y^2)}{R^2} + \frac{12r^2 y^2}{R^4} \right], \quad \sigma_y^2 = \frac{k_2 \sigma r^2}{2R^2} \left[ 1 - \frac{3r^2 + 14y^2}{R^2} + F - G \right], \\ \sigma_x^2 &= \frac{-k_2 \sigma r^2}{2R^2} \left[ 5 - \frac{3r^2 + 22y^2}{R^2} + F - G \right], \quad \sigma_{xy}^2 = \frac{-k_2 \sigma r^2 yx}{R^4} \left[ 5 - \frac{2(3r^2 + 4y^2)}{R^2} + \frac{12r^2 y^2}{R^4} \right], \\ k_1^\infty &= \frac{5 + \nu_1}{3 + 2\nu_1 - \nu_1^2} \quad \text{и} \quad k_2^\infty = \frac{1 - 3\nu_1}{3 + 2\nu_1 - \nu_1^2}. \end{aligned}$$

В каждом кристаллите задавалось случайное направление сдвига. Критерием вовлечения кристаллита в пластическую деформацию было достижение критического напряжения сдвига в центре каждого кристаллита вдоль данного направления. Каждый из кристаллитов мог находиться либо в упруго-, либо в пластически предеформированном состояниях. Кристаллит, вовлеченный в пластическую деформацию, представляли очагом пластической деформации круговой формы, характеризуемым полем напряжений согласно аналитическим выражениям, полученным ранее в работах [2, 3]. Из этих выражений следует, что вовлечение зерна в пластическую деформацию сопровождается возникновением неоднородного поля напряжений вне и падением напряже-

ния на определенную величину внутри кристаллита. В данном случае принимали, что величина релаксации (падения напряжения) составляла  $1/2$  величины внешнего приложенного напряжения. Каждый акт вовлечения требовал расчета минимального внешнего напряжения, при котором только в одном кристаллите из всех наступает критическое напряжение сдвига.

## 2. Неупрочняющийся поликристалл с абсолютно жестким включением

На рис.1,а представлен случай развития локализованной деформации в поликристалле с абсолютно жестким включением, когда в каждом кристаллите действует только одна система скольжения. Видно, что жесткое включение играет роль макроконцентратора напряжений, вблизи которого тангенциальное напряжение достигает критической величины и начинается пластическое течение поликристалла. В данном случае критическое сдвиговое напряжение принято равным 50 МПа. Локализация деформации далее развивается в виде полосы, которая быстро распространяется по всему сечению образца под углом в среднем  $55^\circ$  к оси растяжения.

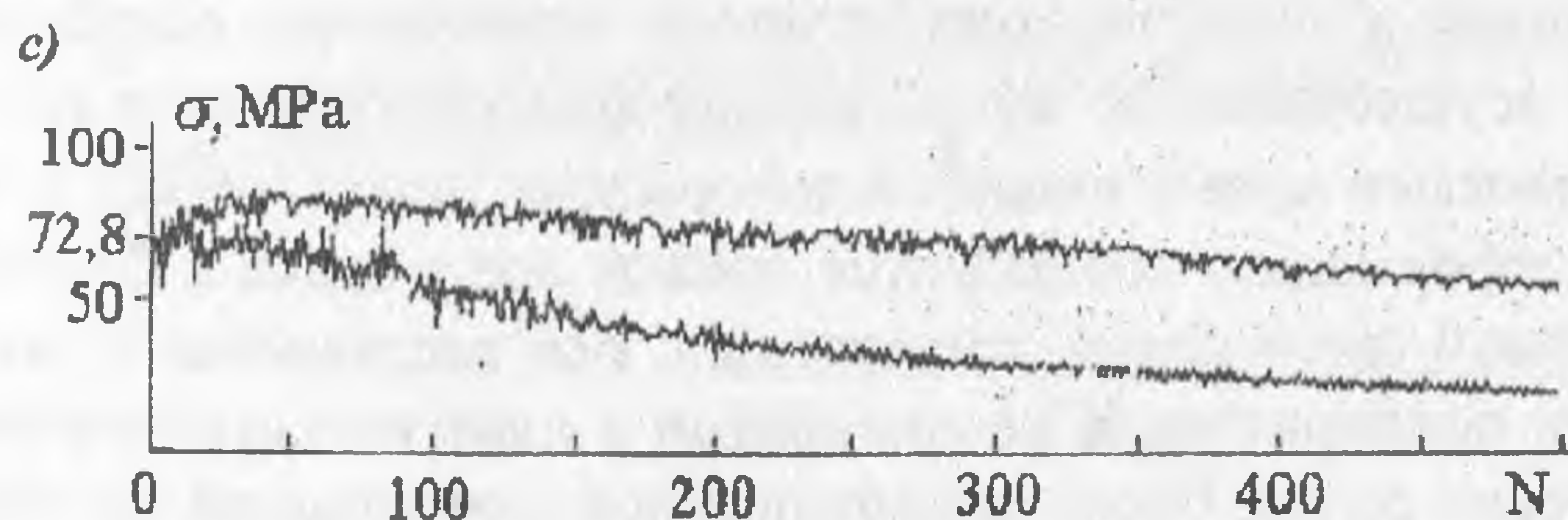
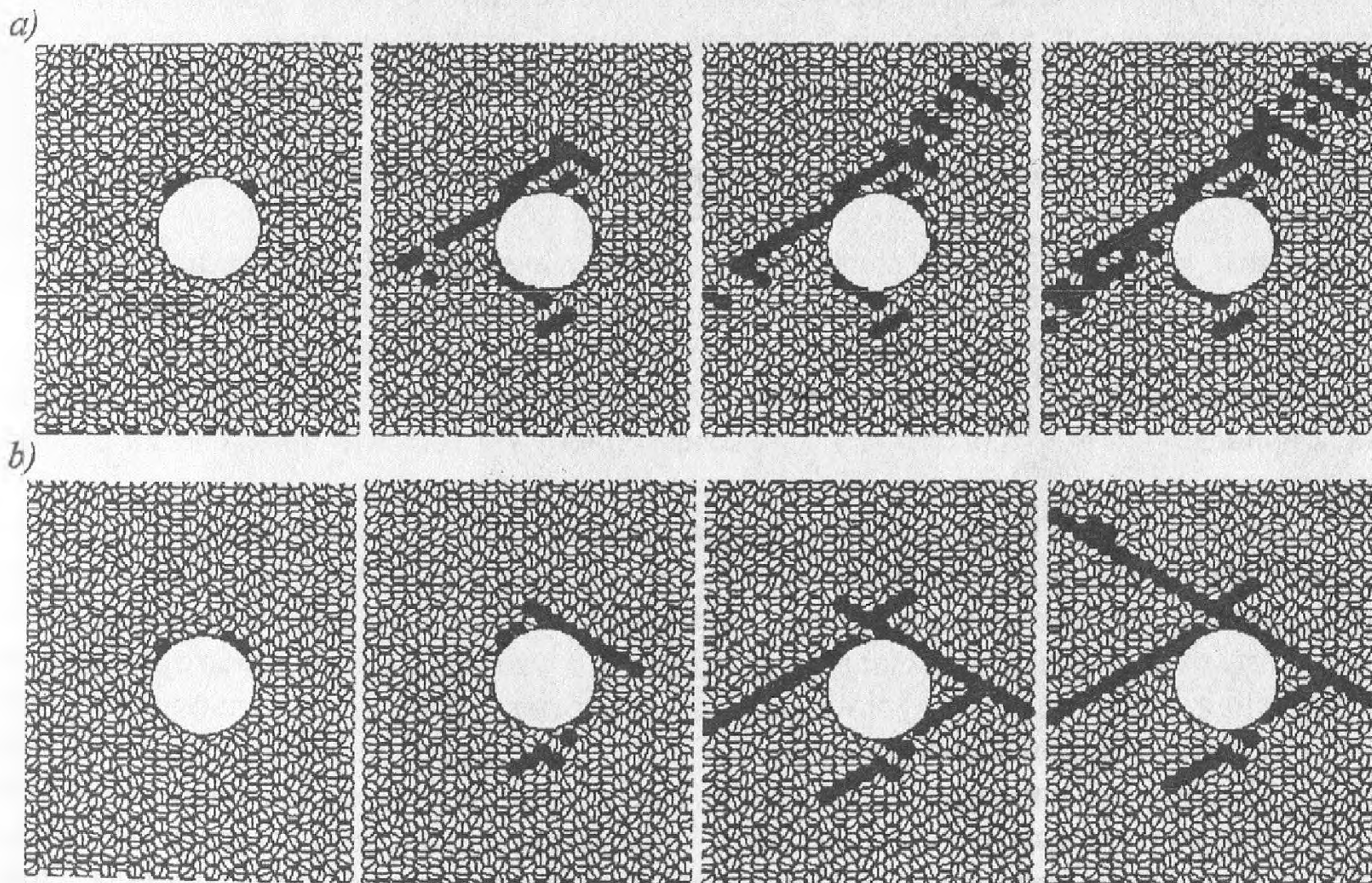


Рис.1. Этапы развития локализации пластической деформации поликристалла с жестким включением без учета деформационного упрочнения: а – с учетом единственной системой скольжения; б – с учетом двух систем скольжения; в – диаграммы нагружения, соответствующие вышеуказанным случаям (верхняя кривая с учетом единственной системы скольжения, нижняя — с учетом двух систем скольжения в кристаллитах);

Для определения роли количества систем скольжения в локализации пластической деформации в каждом кристаллите задавали дополнительную систему скольжения под углом  $30^\circ$  по часовой стрелке к направлению первой системы. В отличие от предыдущего случая в формирующихся макрополосах наблюдается сильная локализация пластической деформации (рис.1,б). Макрополосы шириной не более диаметра зерна ориентируются под углом  $60^\circ$  к оси растяжения. В полосах одни и те же зерна вовлекаются в пластическую деформацию много раз. Формирование полос локализованной деформации с самого начала происходит при падающем внешнем приложенном напряжении. Такой поликристалл на всех этапах нагружения характеризуется более низкими значениями напряжений течения, чем в случае поликристаллов с единственной системой скольжения в кристаллитах.

На рис.1,с приведены диаграммы нагружения в виде зависимости внешнего напряжения от числа вовлечений зерен в пластическую деформацию. Видно, что в среднем формирование полосы пластической деформации вблизи включения требует роста внешнего приложенного напряжения. Затем, когда уже сформировалась макрополоса локализованной деформации через все поперечное сечение образца, дальнейшее накопление пластической деформации в полосе происходит при падающем напряжении. Одни и те же зерна вовлекаются в пластическую деформацию несколько раз.

### 3. Сильноупрочняющийся поликристалл с абсолютно жестким включением

Иная картина развития локализованной пластической деформации получается в случае способности кристаллитов к сильному деформационному упрочнению. Деформационное упрочнение определяли условием, что критическое напряжение сдвига кристаллита возрастает в  $k$  раз после акта вовлечения его в пластическую деформацию. На рис.2 приведен пример для случая когда коэффициент  $k = 100$ . Это практически исключало повторное вовлечение зерен в пластическую деформацию.

Начало пластического течения, как и в предыдущем случае, связано с вовлечением в пластическую деформацию зерен, граничащих с включением, и требует незначительного роста внешнего приложенного напряжения. Далее наблюдаются существенные отличия как диаграмм нагружения, так и в распределении развитии очагов локализации пластической деформации. На диаграммах нагружения сильноупрочняющихся поликристаллов четко наблюдается две стадии деформационного упрочнения (рис.2). Первую стадию можно определять как стадию легкого скольжения, отличающуюся незначительным деформационным упрочнением. Она начинается с момента, когда пластическое течение начинает охватывать зерна на краю поликристалла. При этом роль включения в качестве концентратора существенно ослабляется. Пластическая деформация осуществляется путем равномерного заполнения поверхности поликристалла мезополосами локализованной деформации под углом  $60^\circ$  к оси растяжения. В пластическую деформацию вовлекаются прежде всего зерна с благоприятно ориентированной системой скольжения относительно оси растяжения. С момента заполнения всей площади поликристалла мезополосами в пластическую деформацию начинают вовлекаться зерна со все более неблагоприятной ориентацией системы скольжения. На диаграммах нагружения в это время начинается вторая стадия, характеризующаяся быстро увеличивающимся коэффициентом деформационного упрочнения.

В случае сильно упрочняющегося поликристалла дополнительная система скольжения тоже приводит к усилению локализации пластической деформации (рис.2,б). Уже не наблюдается равномерного заполнения поверхности поликристалла полосами мезоскопического масштаба. Начало пластического течения связано с быстрым формированием узких макрополос локализации деформации, зарождающихся на

включении и распространяющихся через все сечение поликристалла под углом  $60^\circ$  к оси растяжения. Далее происходит фрагментирование этими полосами всей поверхности поликристалла. Плотность зерен, вовлеченных в пластическую деформацию, вблизи включения остается высокой до самого конца нагружения.

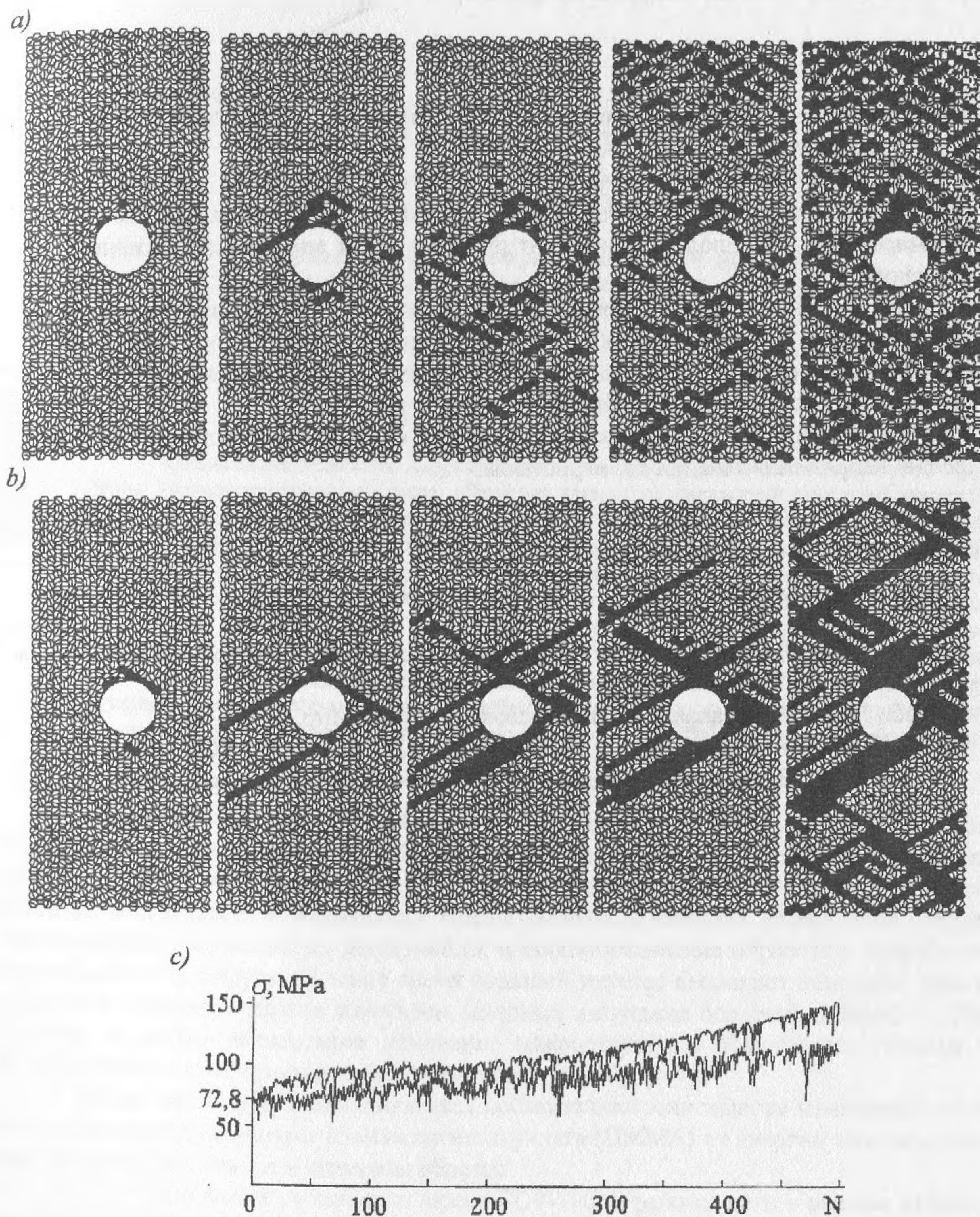


Рис.2. Этапы развития локализации пластической деформации поликристалла с жестким включением с учетом деформационного упрочнения: а – с учетом единственной системой скольжения; б – с учетом двух систем скольжения; в – диаграмма нагружения, соответствующие вышеуказанным случаям (верхняя кривая с учетом единственной системы скольжения, нижняя – с учетом двух систем скольжения в кристаллитах);

Усиление локализации деформации приводит к уменьшению напряжения течения поликристалла и к увеличению стадии легкого скольжения, которая практически начинается с самого начала нагружения (рис.2,с).

#### 4. Выводы

- Включение является макроконцентратором напряжений, с которого начинает развиваться пластическая деформация;
- В неупрочняющихся поликристаллах от включения формируются макрополосы локализованной деформации, ориентированные под углом  $45-60^\circ$  к оси растяжения. Формирование макрополос происходит при падающем внешнем приложенном напряжении;
- В сильноупрочняющихся поликристаллах наблюдается формирование мезополос деформации по всему объему образца. Равномерное заполнение объема поликристалла мезополосами требует роста внешнего напряжения. На диаграмме нагружения фиксируются две стадии деформационного упрочнения;
- Увеличение числа систем скольжения приводит к усилению локализации и уменьшению напряжения течения поликристалла.

#### Список литература

1. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости - М.: Наука, 1977. - 708с.
2. Эшелби Дж. Континуальная теория дислокаций. - М.: Мир, 1977.
3. Де Вит Р. Континуальная теория дисклинаций. - М.: Мир, 1977. - 209с.
4. Лихачев В.А., Волков А.Е., Шудегов В.Е. Континуальная теория дефектов. - Л.: Изд. ЛГУ, 1986, 232 с.